倒春寒天气蜜蜂授粉对油用牡丹产量和品质的影响*

张凯月[1**] 王 翔[2] 鲍俊毅[1] 王 浩[1]
贺春玲[2***] 侯小改[1***]

（1. 河南科技大学农学院，牡丹学院，洛阳 471000；2. 河南科技大学园艺与植物保护学院，洛阳 471000）

摘 要 **【目的】** 倒春寒是典型的气候灾害现象，严重影响农作物的生长发育过程和产量。蜜蜂授粉能显著提高农作物的产量、品质和经济价值。本研究以油用牡丹‘凤丹’为研究对象，旨在明确蜜蜂授粉能否缓解倒春寒天气对其作物产量和品质的影响，为有效利用蜜蜂资源奠定基础。**【方法】** 2017-2020 年，在油用牡丹基地的传粉网室内分别放置西方蜜蜂 *Apis mellifera* 和地熊蜂 *Bombus terrestris*，测定不同年份以及同一年份不同授粉方式下油用牡丹的结实、产量和品质；同时，重点比较分析在倒春寒天气影响下，西方蜜蜂和地熊蜂授粉对油用牡丹产量和品质的影响。**【结果】** 2018 年河南洛阳地区发生了中度倒春寒天气灾害，大田油用牡丹雄蕊的冻害率达到 70.20%，单株产量平均为（4.85±0.81）g，相比较于 2017、2019 和 2020 年显著减产了 1 094.86%、1 401.24%和 893.60%（$P < 0.01$）；连续 4 年的研究结果表明，与自然对照相比，西方蜜蜂和地熊蜂授粉可使油用牡丹的单株产量分别提高 85.43%-499.38%和 35.86%-357.94%（$P < 0.01$），且西方蜜蜂的授粉效果优于地熊蜂；2018 年倒春寒天气下，西方蜜蜂授粉使油用牡丹的产量（单株产量）增加 499.38%（$P < 0.01$），地熊蜂授粉增加了 203.71%（$P < 0.01$）；西方蜜蜂和地熊蜂授粉对油用牡丹的出油率和总不饱和脂肪酸含量无显著差异（$P > 0.05$）；西方蜜蜂授粉使油用牡丹的减产率降低了 407.18%，地熊蜂授粉使减产率降低了 133.04%。**【结论】** 倒春寒天气灾害导致油用牡丹减产严重，但不影响来年油用牡丹的生产力；西方蜜蜂和地熊蜂可以显著缓解倒春寒天气对油用牡丹的减产作用，且西方蜜蜂的授粉效果优于地熊蜂。

关键词 倒春寒；油用牡丹；西方蜜蜂；地熊蜂；授粉；产量

Effects of bee pollination on yield and quality of oil tree peony in the extreme weather spring freeze

ZHANG Kai-Kue[1**] WANG Xiang[2] BAO Jun-Yi[1] WANG Hao[1]
HE Chun-Ling[2***] HOU Xiao-Gai[1***]

(1. College of Agriculture, Tree Peony, Henan University of Science & Technology, Luoyang 471000, China;
2. College of Horticulture and Plant Protection, Henan University of Science & Technology, Luoyang 471000, China)

Abstract **[Objectives]** Spring freeze is a typical climate disaster, which will seriously affect the growth and yield of agricultural and forestry crops. Bee pollination can significantly improve the yield, quality and economic value of crops. This study took the oil tree peony ‘Fengdan’ as the research object, and aimed to determine whether bee pollination could alleviate the impact of spring freeze on crop yield and quality, and lay a foundation for the effective use of bee resources. **[Methods]** From 2017 to 2020, *Apis mellifera* and *Bombus terrestris* were placed in the pollination net room of the oil tree peony base to determine the fruit, yield and quality in different years and different pollination methods in the same year. At the same time,

*资助项目 Supported projects：河南省创新型科技人才队伍建设工程（中原学者支持计划）（202101510003）；国家科技部基础调查专项（2018FY100404）；洛阳市乡村振兴专项（2101099A）

**第一作者 First author，E-mail：zhangkaiyue95@126.com

***共同通讯作者 Co-corresponding authors，E-mail：hechunling68@126.com；hkdhxg@haust.edu.cn

收稿日期 Received：2022-07-04；接受日期 Accepted：2022-08-24

under the influence of the spring freeze, the effect of pollination by *A. mellifera* and *B. terrestris* on the yield and quality of oil tree peonies was focused on comparative analysis. **[Results]** In 2018, the freezing injury rate of stamens in the oil tree peony field reached 70.20% and the per plant yield was (4.85±0.81)g, which significantly reduced by 1 094.86%, 1 401.24% and 893.60%, respectively ($P < 0.01$). The results over 4 consecutive years show that *A. mellifera* and *B. terrestris* significantly increase the per plant yield of oil tree peonies by 85.43%-499.38% and 35.86%-357.94%, respectively ($P < 0.01$), and that *A. mellifera* increases the yield more than *B. terrestris*. In 2018, *A. mellifera* pollination significantly alleviated the reduction in yield per plant by 499.38% ($P < 0.01$), whereas pollination by *B. terrestris* significantly alleviated it by 203.71% ($P < 0.01$). There was no significant difference in the oil yield, or total unsaturated fatty acid content, of tree peonies pollinated by either *A. mellifera* or *B. terrestris* ($P < 0.05$). *A. mellifera* pollination reduced the yield reduction rate of oil tree peonies by 407.18%, whereas pollination by *B. terrestris* reduced the yield reduction rate by 133.04%. **[Conclusion]** Spring freeze significantly reduced the yield of oil tree peonies, but did not affect their productivity the following year. Pollination by either *A. mellifera* or *B. terrestris* can significantly alleviate the adverse impact of a spring freeze on oil tree peony yields, the former more so than the latter.

Key words spring freeze; oil tree peony; *Apis mellifera*; *Bombus terrestris*; pollination; yield

倒春寒是指每年春季前期（一般指 3 月）气温升高比较快，而在春季后期（一般指 4 月或 5 月）气温比正常年份低的天气现象，它是对农作物生长影响最大的低温灾害之一（杨文刚等，2018）。在春季早稻种植期，低温和多雨天气会使幼苗生活力降低，导致植株缺乏营养，严重影响水稻的产量和品质（周荣芳等，2011）。小麦遭遇倒春寒后，叶子会变白、干枯，降低了叶片的光合作用，降低了穗数和每穗粒数，降低了最终籽粒产量（Li *et al.*，2014，2015）。在小麦、大麦、马铃薯、核桃和苜蓿作物上，低温影响发芽、幼苗生长和分蘖从而导致产量降低（Karimzadeh *et al.*，2019；Kaur *et al.*，2020；陈翔等，2021）；在葡萄上，倒春寒使初生芽发生了超过 80%的冻害，而在来年葡萄充分恢复了生产力，且果实产量增加了 61%，果实品质也有所提高（Frioni *et al.*，2017）。冻害发生后的补救措施主要有灌水、施肥、修剪和化学保护以及人工授粉和补充蜜蜂授粉等（李洪彰，2018；李靖等，2018），尽可能低的减少冻害对产量的影响；在苹果园中补充蜜蜂授粉使幼果的受冻率降低近 40%（雷亚珍，2017），而倒春寒天气对油用牡丹产量和品质的影响未见报道。

传粉昆虫在农业生态系统中为作物提供的授粉服务提高了作物的产量、品质和商业价值（Klein *et al.*，2007）。西方蜜蜂 *Apis mellifera* L. 和熊蜂 *Bombus* spp.是世界上使用最广泛的授粉蜂种，也是具有人工管理的蜂群（Garibaldi *et al.*，2013；Stern *et al.*，2021），已被广泛应用于农作物、果蔬、坚果和油料作物等，使产生更大/多的果实/种子，更高的含油量，畸形更少，商业等级更高（果实颜色、硬度、保质期等）（Abrol and Shankar，2011；Klatt *et al.*，2014；Silva *et al.*，2018；Zhang *et al.*，2022 a，2022 b），且改善了果实和作物籽油的品质（Free，1993；Riccardo *et al.*，2012）。

油用牡丹是原产于我国且我国特有的木本油料作物，具有很高的油用价值和经济价值。牡丹种子含油量高，且富含不饱和脂肪酸（>90%），其中人体所必需的 α-亚麻酸含量高达 40%以上（王顺利等，2016；李育材，2019；Wang *et al.*，2019）。牡丹属于两性花系，是典型的虫媒花，自交结实率极低，需要依赖传粉昆虫来提高结籽率（罗毅波等，1998；韩欣等，2014；Xie *et al.*，2017）。有研究表明，‘凤丹’牡丹的访花昆虫种类主要有蜂类、蚁类、甲虫类及蝇类 4 个类群，其中西方蜜蜂 *Apis mellifera*、中华蜜蜂 *Apis cerana cerana* 和黄熊蜂 *Bombus flavescens* 为主要的传粉昆虫（罗长维等，2019），且西方蜜蜂和地熊蜂可以显著提高油用牡丹的传粉效率和产量（He *et al.*，2019，2020；张凯月等，2019）。而倒春寒天气传粉昆虫授粉对油用牡丹产量和品质的影响未见报道。

本文以油用牡丹‘凤丹’（*Paeonia ostii* T. Hong et J. X. Zhang）为研究对象，通过测定不同

年份以及同一年份西方蜜蜂和地熊蜂粉对其结实、产量和品质的影响，比较分析在倒春寒天气影响下，西方蜜蜂和地熊蜂授粉对油用牡丹产量和品质的影响作用，旨在提出一种倒春寒对农作物损害的补救措施，为提高作物产量以及高效、合理利用传粉蜂资源提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点

研究地点位于河南省洛阳市伊滨区洛阳东花牡丹苑（洛阳贞观牡丹种植有限公司，地理坐标：东经 34°37′，北纬 112°39′、海拔 143 m），在 2017-2020 年的 4-8 月牡丹花期至果实成熟期，连续 4 年进行野外试验。东花牡丹苑种植油用牡丹品种为‘凤丹’，种植面积约 40 hm^2，试验树龄为 8-11 年。

2017-2020 年 4 月花期期间洛阳气候状况如图 1（日均温）和图 2（日最低温）所示。根据倒春寒发生的标准（杨文刚等，2018）判定 2018 年 4 月 4-7 日以及 4 月 12-15 日在洛阳出现倒春寒天气，出现倒春寒天气的总天数为 8 d。按照倒春寒天气的危害程度指标（杨文刚等，2018）得出，2018 年的倒春寒等级为中度倒春寒（K=3.320 9），在倒春寒天气发生期间最低温度降到了 3 ℃。

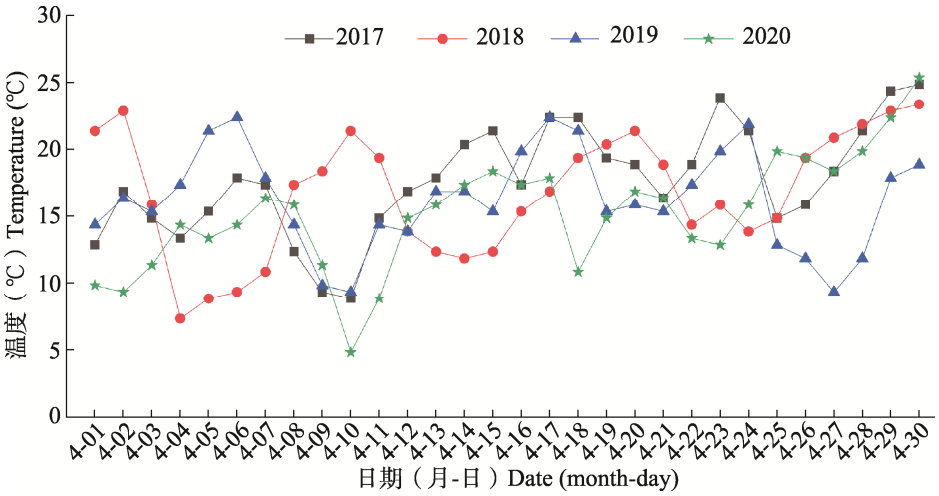

图 1 2017-2020 年 4 月份日平均温度变化趋势

Fig. 1 Variation trend of daily average temperature of April from 2017 to 2010

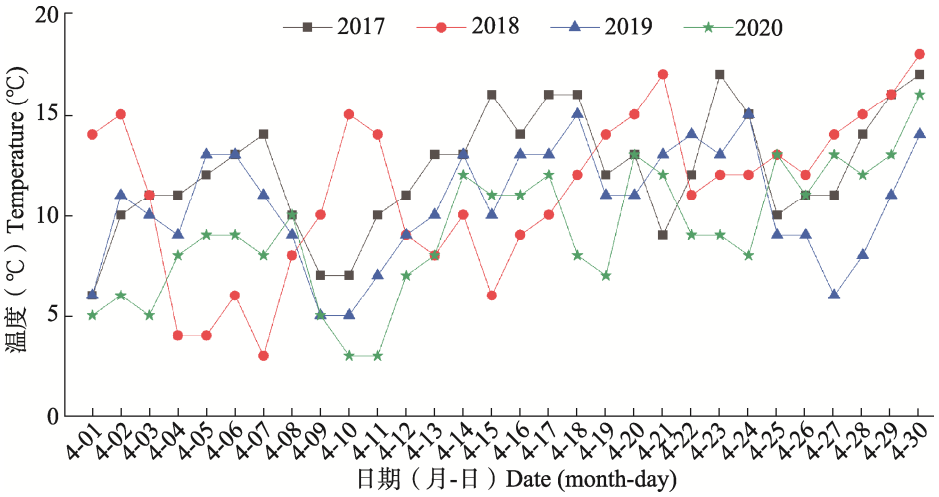

图 2 2017 年-2020 年 4 月份日最低温度变化趋势

Fig. 2 Variation trend of daily minimum temperature of April from 2017 to 2020

1.2　试验设计

在油用牡丹样地搭建传粉网室（东西长：15 m，南北宽：8 m，墙高：2.1 m，脊高：3.2 m），网室材料为聚乙烯材料。分别设置蜜蜂授粉（网室内仅放置西方蜜蜂），熊蜂授粉（网室内仅放置地熊蜂）和网室空白对照（网室内不放置任何授粉蜂种）；另外在网室外设置大田自然对照（露天环境中的自然授粉）。2017 年和 2018 年连续两年分别设置了蜜蜂授粉和熊蜂授粉（图 3：A），2019 年仅设置蜜蜂授粉（图 3：B），2020 年仅设置了熊蜂授粉（图 3：B）；各区域油用牡丹株数平均为 956 株，网室内外采用相同的管理措施。

供试蜂种为西方蜜蜂 *Apis mellifera* 和地熊蜂 *Bombus terrestris*，其中西方蜜蜂由洛阳李楼养蜂场提供，地熊蜂由北京嘉禾源硕生态科技有限公司提供。当网室内有一朵花开放时，开始向传粉网室内放置传粉蜂，西方蜜蜂（1 箱约 8 000 头）和地熊蜂（1 箱 200 头）。具体的试验设计如图 3 所示。

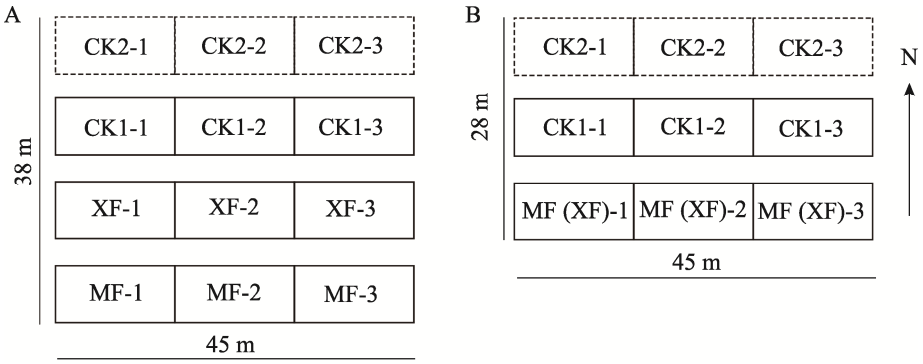

图 3　传粉网室设计平面图

Fig. 3　Floor plan of the pollinator net room

A. 2017 和 2018 年试验设计图；B. 2019 和 2020 年试验设计图。MF：西方蜜蜂授粉网室；XF：地熊蜂授粉网室；CK1：空白对照网室；CK2：大田自然对照区域。

A. Experimental design diagram in 2017 and 2018; B. Experimental design diagram in 2019 and 2020. MF: *A. mellifera* pollination net room; XF: *B. terrestris* pollination net room; CK1: Blank control net room; CK2: Field control.

1.3　冻害评估方法

在 2018 年 4 月 1-15 日，牡丹开花期统计单株牡丹雄蕊的冻害率。冻害的判定标准为：牡丹黄色雄蕊变黑，每朵花雄蕊变黑的程度超过雄蕊总数的 10%以上为受害花朵（图 4）。

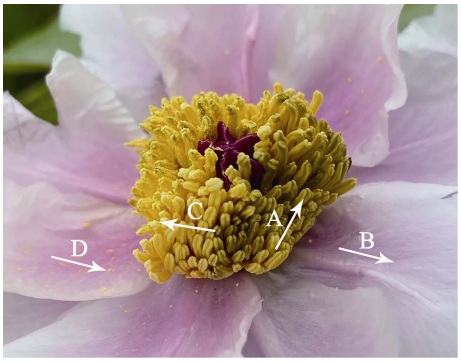

图 4　油用牡丹花受冻害情况

Fig. 4　Freezing damage of oil tree peony flower

A：受冻害的雄蕊；B：受冻害雄蕊未有花粉散落；C：未受冻害的雄蕊；D：正常发育雄蕊散落的花粉。

A: Freeze-damaged stamens; B: No pollen scattered; C: Freeze-damaged stamens; D: Pollen scattered from normal developing stamens.

1.4　产量参数和籽油品质的测定

在当年 7 月底或 8 月初，种子收获期，在不同授粉区域分别采收 80-100 株，单株单果分别用报纸包裹采收，带回实验室放置在通风荫凉处自然干燥 30 d，让其完成后熟。果实后熟完成后，统计各处理油用牡丹的产量指标：（1）果实发育率：有效蓇葖数（油用牡丹聚合蓇葖果中结籽的蓇葖数）/单果蓇葖数（油用牡丹聚合蓇葖果的

总蓇葖数）；（2）单果籽粒数：单个牡丹聚合蓇葖果的结籽总数；（3）单果籽粒重：单个牡丹聚合蓇葖果中总籽粒的重量；（4）单株籽粒数：一株油用牡丹上的结籽总数；（5）单株籽粒重：一株牡丹上所有果实中总籽粒的重量；（6）千粒重：1 000 粒种子的重量；（7）出仁率：籽仁重/总籽粒重（200 粒种子）；（8）出油率：指籽仁的含油量，即含油量/籽仁重量；（9）籽油脂肪酸含量。采用 HA220-50-06 超临界 CO_2 萃取装置萃取籽油。采用 5977B GC/MSD 气相色谱-质谱联用仪（样品大小：0.2 g）测定牡丹籽油中各种脂肪酸的含量。

1.5 数据处理

采用方差分析（ANOVA）方法评估油用牡丹不同授粉处理的冻害率、不同年份和不同授粉对油用牡丹产量参数和籽油品质的影响；根据统计的产量参数分析倒春寒天气下蜜蜂授粉对油用牡丹减产量和减产率的影响。所有数据的统计、分析和作图均在 SPSS 22.0 和 Origin 2018 中完成。

2 结果与分析

2.1 油用牡丹雄蕊冻害情况

油用牡丹发生冻害表现为黄色的雄蕊发黑和雄蕊顶端破损（图 5：A，E）。受到冻害的牡丹雄蕊不会再进行正常的花粉发育完成散粉，未受到冻害的部分雄蕊会正常发育至成熟，花粉正常散落，且不影响蜜蜂正常的访花活动（图 4，图 5：D-F）。蜜蜂通过采集未受冻害的花粉将其传递到柱头上增加油用牡丹的授粉率，从而提高

图 5 油用牡丹冻害情况及蜜蜂访花活动

Fig. 5 Freezing damage of oil tree peony and bees visiting flowers

A. 花蕾期雄蕊冻害；B. 初开期雄蕊冻害；C. 盛开期雄蕊冻害；
D，E. 西方蜜蜂访问受冻害花朵；F. 地熊蜂访问受冻害花朵。
A. Freezing damage to stamens at bud stage; B. Freezing damage to stamens at initial blooming stage;
C. Freezing damage to stamens at blooming stage; D, E. *A. mellifera* visiting frozen flowers;
F. *B. terrestris* visiting frozen flowers.

油用牡丹的结籽率。

2.2　倒春寒对雄蕊冻害的影响

蜜蜂授粉网室内的雄蕊冻害率为 49.36%±1.38%，熊蜂授粉网室内的雄蕊冻害率为 45.31%±2.52%，网室空白对照的雄蕊冻害率为 43.61%±4.19%，大田自然对照的雄蕊冻害率为 70.20%±3.26%。通过对不同授粉区域油用牡丹雄蕊的冻害率进行方差分析结果表明，3 个网室区域内（蜜蜂授粉、熊蜂授粉和网室空白对照）的雄蕊冻害率无显著差异（P>0.05），大田自然对照的冻害程度显著高于 3 个网室区域内的雄蕊冻害率（F =11.293, P<0.01）（图 6）。

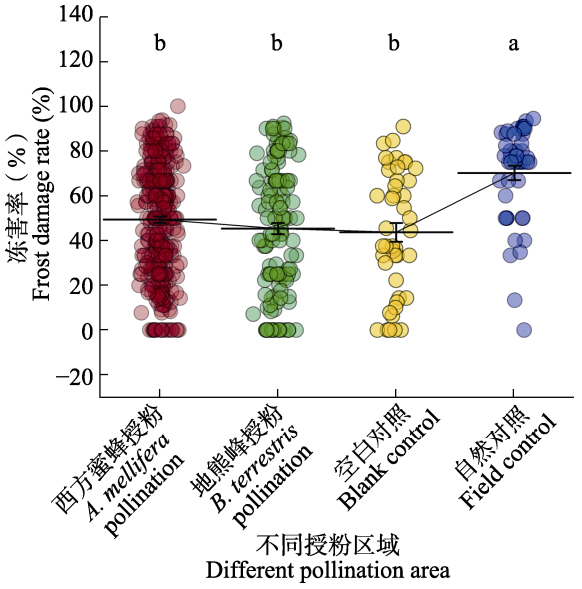

图 6　不同授粉区域油用牡丹的雄蕊冻害率

Fig. 6　Freezing damage rate of stamens of oil tree peony in different pollination areas

图中标有不同小写字母表示差异显著（P<0.05，方差分析）。图 7 同。

Different lowercase letters in the figure indicate significantly different (P < 0.05, One way-ANOVA). The same as Fig. 7.

2.3　倒春寒对油用牡丹产量的影响

通过对 2017-2020 年油用牡丹的产量参数进行方差分析可知（图 7：A-F），2018 年，空白对照网室区域内的果实发育率为 51.95%±1.92%（F= 98.033，P<0.01），单果籽粒数为（8.88±0.55）粒（F=88.393，P<0.01），单果籽粒重为（2.56±0.16）g（F=211.458，P<0.01），单株籽粒数为（51.51±8.94）粒（F=40.542，P<0.01），单株籽粒重为（14.73±2.72）g（F=57.688，P<0.01），千粒重为（278.76±4.09）g（F=49.712，P<0.01），这与 2017、2019 和 2020 年空白对照网室区域内的相比差异显著，且比 2017、2019 和 2020 年的单果籽粒重分别降低了 87.77%，223.05%和 108.20%；单株籽粒重分别降低了 217.72%，555.87%和 257.09%。

大田自然对照区域内，2018 年的果实发育率为 53.78%±2.88%（F=66.905，P<0.01）、单果籽粒数为（7.84±0.67）粒（F=72.392，P<0.01）、单果籽粒重为（2.02±0.18）g（F=65.578，P<0.01）、单株籽粒数为（19.50±3.21）粒（F=40.418，P<0.01）和单株籽粒重为（4.85±0.81）g（F=37.431，P<0.01）和千粒重为（276.44±0.60）g（F=248.084, P<0.01），这与 2017、2019 和 2020 年相比差异显著，且比 2017、2019 和 2020 年的单果籽粒重分别降低了 155.45%，181.68%和 158.42%；单株籽粒重分别降低了 1 094.86%，1 401.24%和 893.60%。

2.4　蜜蜂授粉对油用牡丹产量的影响

通过对不同授粉区域内和不同年份的油用牡丹产量进行双因素方差分析可知（表 1），不同授粉区域内油用牡丹的产量差异显著（P < 0.01）；不同年份间油用牡丹的产量差异显著（P < 0.01），授粉方式和年份的交互作用对油用牡丹产量的影响效果显著（P < 0.01），说明授粉方式可以显著影响油用牡丹的产量，西方蜜蜂授粉和地熊蜂授粉可显著提高油用牡丹的产量，且西方蜜蜂的授粉效果优于地熊蜂。

通过对不同年份补充蜜蜂授粉区域油用牡丹的产量参数进行方差分析可知（图 8），2017、2019 以及 2020 年西方蜜蜂和地熊蜂在油用牡丹的果实发育率、单果籽粒数、单果籽粒重、单株籽粒数和单株籽粒重上的授粉效果均优于 2018 年（P<0.01）。但 2018 年蜜蜂授粉和熊蜂授粉的油用牡丹千粒重均显著高于 2017 年和 2019 年（P<0.01）。

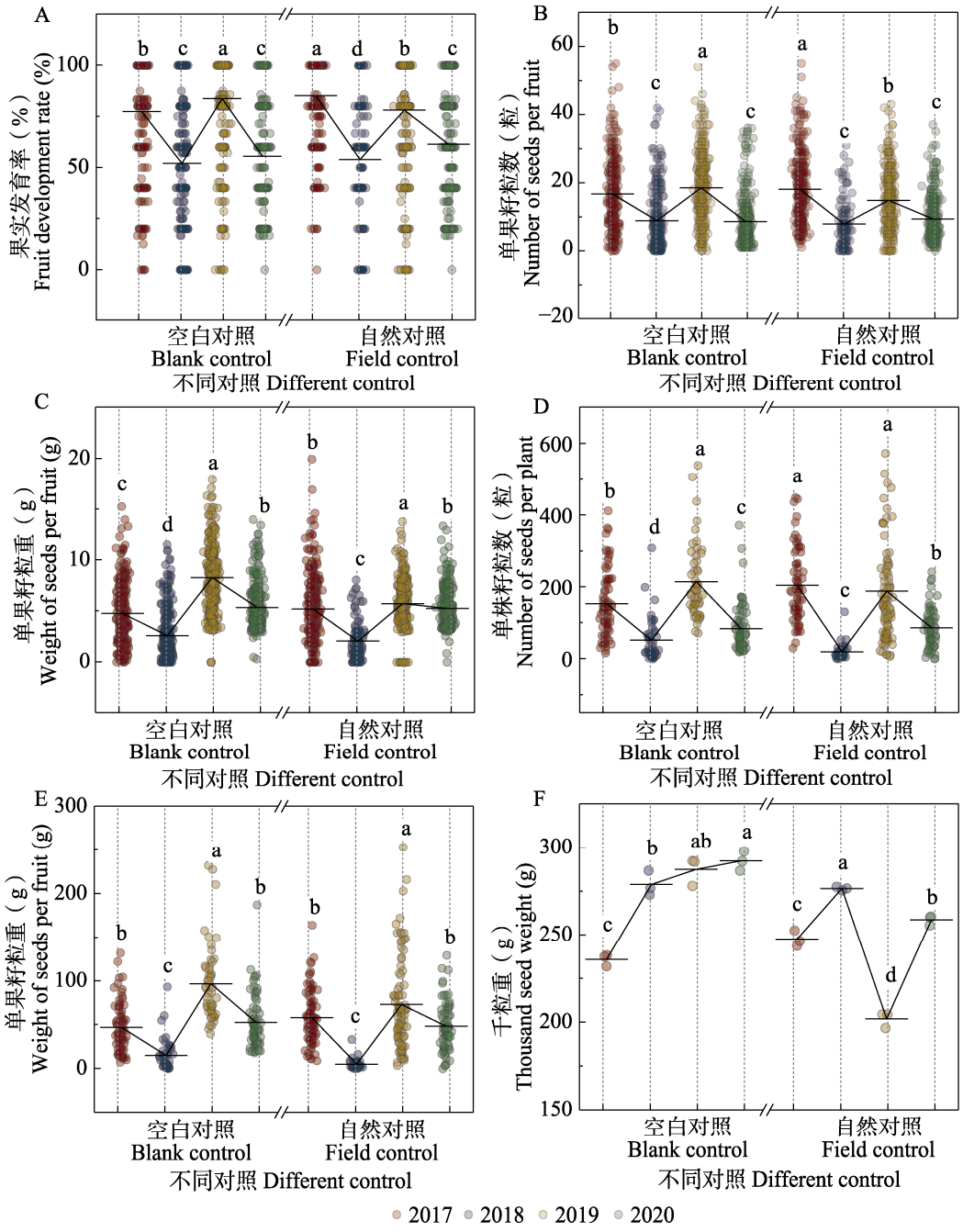

图 7　不同年份对照区域的油用牡丹产量参数比较

Fig. 7　Comparison of yield parameters of oil tree peony in control areas in different years

A. 果实发育率；B. 单果籽粒数；C. 单果籽粒重；D. 单株籽粒数；E. 单株籽粒重；F. 千粒重。

A. Fruit development rate; B. Number of seeds per fruit; C. Weight of seeds per fruit; D. Number of seeds per plant; E. Weight of seeds per plant; F. Thousand seed weight.

2.5　倒春寒天气蜜蜂授粉对油用牡丹产量的影响

通过对 2018 年蜜蜂授粉、熊蜂授粉、空白对照和自然对照区域内油用牡丹的产量参数进行方差分析可知（图 9），西方蜜蜂和地熊蜂在倒春寒天气仍然表现出较好的授粉效果。相比较于大田自然对照，西方蜜蜂授粉分别在油用牡丹的果实发育率、单果籽粒数、单果籽粒重、单株籽粒数和单株籽粒重上显著增加了 59.09%、

表 1　授粉方式和年份对油用牡丹产量的影响

Table 1　Effects of pollination method and year on the yield of oil tree peony

产量参数 Yield parameters	影响因素 Influence factor	*F*	Sig.
果实发育率（%） Fruit development rate (%)	授粉方式 Pollination	192.198	0.000
	年份 Year	126.454	0.000
	授粉方式+年份 Pollination+Year	22.982	0.000
单果籽粒数（粒） Number of seeds per fruit	授粉方式 Pollination	293.083	0.000
	年份 Year	15.142	0.000
	授粉方式+年份 Pollination+Year	183.153	0.000
单果籽粒重（g） Weight of seeds per fruit (g)	授粉方式 Pollination	320.432	0.000
	年份 Year	177.584	0.000
	授粉方式+年份 Pollination+Year	13.280	0.000
单株籽粒数（粒） Number of seeds per plant	授粉方式 Pollination	121.018	0.000
	年份 Year	155.602	0.000
	授粉方式+年份 Pollination+Year	12.268	0.000
单株籽粒重（g） Weight of seeds per plant (g)	授粉方式 Pollination	89.056	0.000
	年份 Year	173.937	0.000
	授粉方式+年份 Pollination+Year	7.993	0.000
千粒重（g） Thousand seed weight (g)	授粉方式 Pollination	22.352	0.000
	年份 Year	39.745	0.000
	授粉方式+年份 Pollination+Year	14.581	0.000

199.36%、199.50%、427.74%和 499.38%；地熊蜂授粉分别显著增加了 48.40%、132.18%、165.17%、320.05%和 203.71%。西方蜜蜂和地熊蜂授粉的油用牡丹千粒重、出仁率、出油率、α-亚麻酸和总不饱和脂肪酸与空白对照和自然对照无显著差异（P>0.05）。

2.6　倒春寒天气蜜蜂授粉对油用牡丹产量的作用

通过对 2017、2019 和 2020 年连续 3 年西方蜜蜂和地熊蜂授粉对油用牡丹产量的影响分析可知，正常天气情况下，西方蜜蜂授粉可使油用牡丹的产量平均增加 92.20%，地熊蜂授粉可使油用牡丹的产量平均增加 70.67%。在 2018 年极端倒春寒天气条件下，西方蜜蜂授粉可使油用牡丹的减产率降低 407.18%，地熊蜂授粉可使油用牡丹的减产率降低 133.04%。西方蜜蜂和地熊蜂均显著缓解倒春寒天气对油用牡丹的减产造成的危害，且西方蜜蜂的授粉效果优于地熊蜂。

3　讨论

倒春寒是使农作物减产的常见农业气象灾害（Li *et al.*，2014），春季的低温天气冻害作物的花芽、柱头及幼果等，使得作物严重减产甚至绝收（张秀梅，2017）。本研究结果表明，倒春寒对油用牡丹的冻害主要表现为雄蕊发黑和雄蕊破损，且冻害在花蕾期、初开期以及盛开期均有发生，最终导致果实发育不全甚至整果败育发黑最后脱落。与 2017 年没有发生冻害的年份相比，2018 年因倒春寒天气的影响，油用牡丹大田的单株产量降低了 1 094.86%；而 2019 年和 2020 年，油用牡丹的产量分别提高了 1 401.24%和 893.60%，但对籽油品质无显著影响，说明倒春寒不影响来年油用牡丹的生产力，这与倒春寒对葡萄的影响研究结果相似（Frioni *et al.*，2017）。

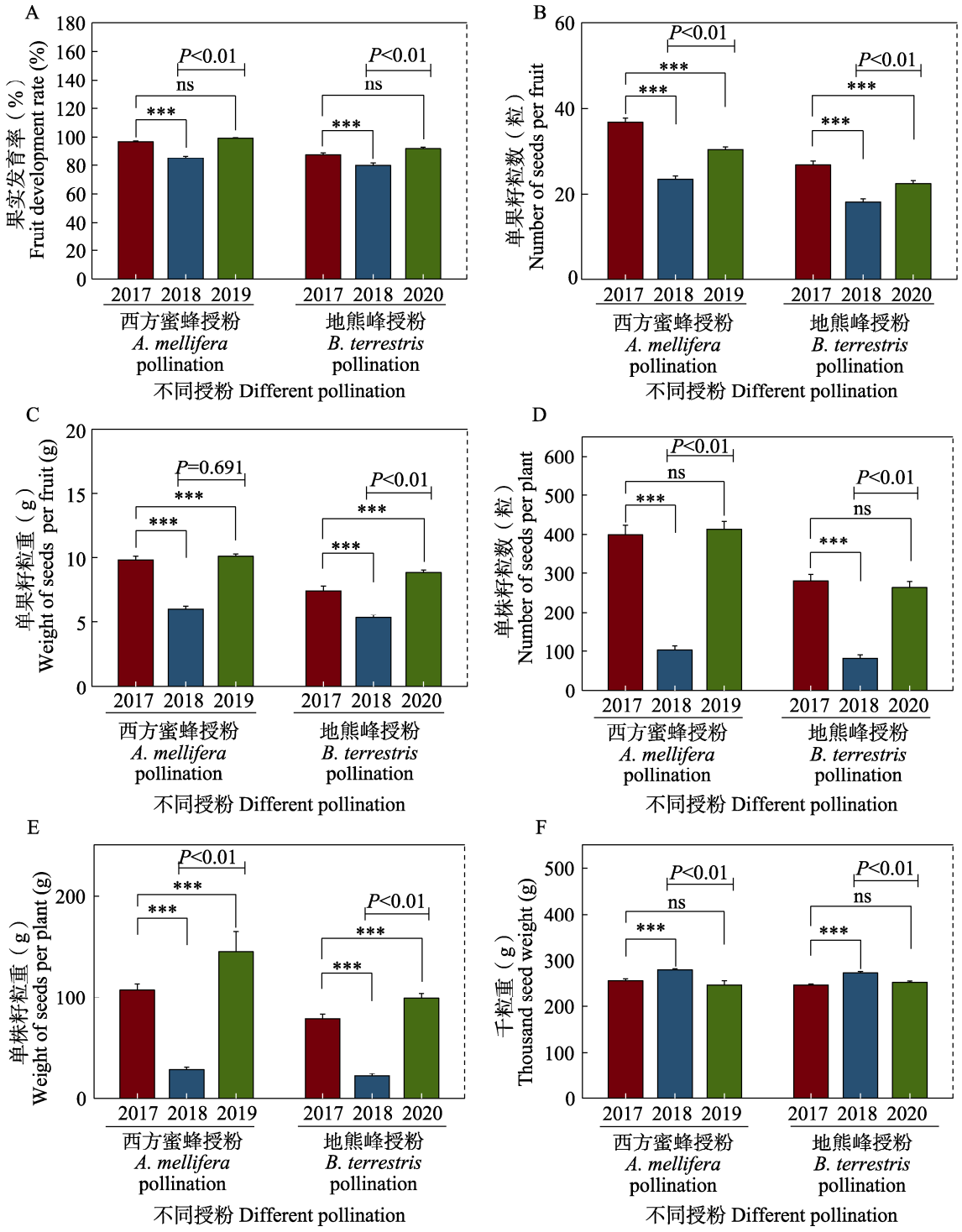

图 8　不同年份蜜蜂授粉效果比较

Fig. 8　Comparison of bee pollination effect in different years

A. 果实发育率；B. 单果籽粒数；C. 单果籽粒重；D. 单株籽粒数；E. 单株籽粒重；F. 千粒重。*表示 $P < 0.05$，**表示 $P < 0.01$，***表示 $P < 0.001$。

A. Fruit development rate; B. Number of seeds per fruit; C. Weight of seeds per fruit; D. Number of seeds per plant; E. Weight of seeds per plant; F. Thousand seed weight. Asterisks indicate significance levels (* < 0.05, * * < 0.01, * * * < 0.001).

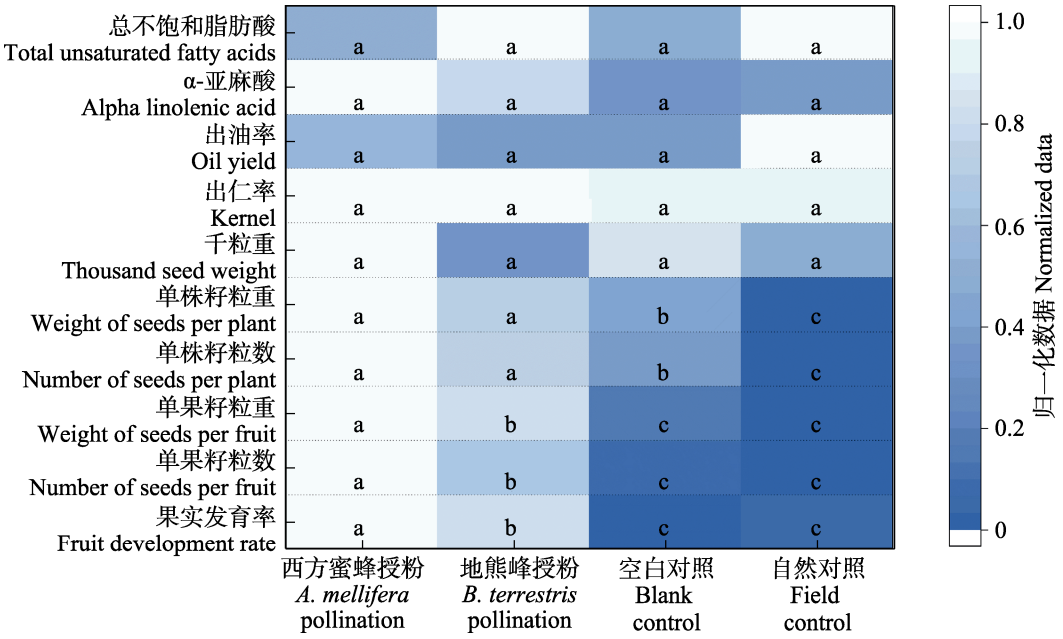

图 9　2018 年不同授粉区域内产量及品质参数比较

Fig. 9　Comparison of yield and quality parameters in different pollination areas in 2018

图中标有不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$，One way-ANOVA）。

Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$, One way-ANOVA).

倒春寒使小麦减产的幅度在 19.1%- 97.6%，导致小麦减产的主要原因是花粉母细胞分裂、花药影响供应不足导致可孕小花数减少（陈翔等，2021；高芸等，2021）。试验期间作者观测发现，低温使油用牡丹的雄蕊发生冻害而变黑，使得雄蕊不能发育成熟散粉，且油用牡丹是自花授粉结实率极低的作物，推测这是倒春寒导致油用牡丹减产的主要原因，具体原因的还需要进一步分析。

授粉是果实和种子生产的关键，蜜蜂是许多野生植物和农作物的重要传粉者，在维持自然生态系统和农业生态系统的平衡中发挥着重要作用（Abrol，2012；Ollerton，2017）。西方蜜蜂和地熊蜂为油用牡丹提供了有价值的授粉服务，这有力地证明了蜜蜂在农田中的授粉潜力和它们对作物强大的适应性。本研究发现西方蜜蜂和地熊蜂为油用牡丹授粉显著提高了果实发育率和种子产量，且西方蜜蜂的授粉效果显著高于地熊蜂授粉。蜜蜂出巢访花与温度、光照、湿度等多种因素有关（陈盛禄，2001），西方蜜蜂在油用牡丹上的访花高峰期是 9:30-11:45，地熊蜂在油用牡丹上的访花高峰期为 6:00-10:00，而在此期间西方蜜蜂的访花频率高于地熊蜂，且单花访问次数高于地熊蜂（He *et al.*，2020），西方蜜蜂在油用牡丹上的群体授粉效率显著高于地熊蜂，这可能也与放蜂量的差异有关。有研究报道，传粉效率除了与访花频率有关外，也与访花者携带的花粉量和柱头上花粉的沉降量有关（Thomson and Goodell，2001；Javorek *et al.*，2002），而在我们的后续研究中发现单个地熊蜂的携粉率优于西方蜜蜂，具体的个体传粉蜂在柱头上的花粉沉降量及授粉效率研究还有待进一步研究。

随着全球气候的变化，极端气候出现的几率越来越高，低温已经成为影响农作物生长和生产的重要环境因子之一。不同的农作物在发生冻害后采用的应对/补救措施不同，在茶园受到冻害后采用选取优良品种、行间套种绿肥或培土增温或熏烟、覆盖、淋喷、安装防霜风扇等以减少冻害（郝心愿等，2020）。果树发生冻害后的补救措施主要有剪、锯受害枝干涂抹化学试剂然后采用劈接、切接等方法高接当地优良品种或加强水肥管理和及时防治病虫害等（甄灿福，2007）。李和香梨花期在受到倒春寒冻害后采用人工授

粉和放蜂授粉等措施来补救受冻害较轻的花朵授粉来提高座果率（井春芝，1999；李靖等，2018），且在花期冻害情况下蜜蜂授粉使苹果的冻害减产率降低了 44.44%-61.54%（雷亚珍，2017）。本研究在油用牡丹受冻害后补充蜂媒授粉，有效的缓解了油用牡丹的减产，与大田产量相比，西方蜜蜂授粉使油用牡丹的冻害减产率降低了 407.18%，地熊蜂授粉使油用牡丹的冻害减产率降低了 133.04%。有研究报道，蜜蜂授粉是有选择性的采集成熟度最佳的花粉，能充分利用有效花。在倒春寒天气下，蜜蜂将有活力的花粉传递到柱头上，使其充分受精，显著提高了未受冻花的坐果率（罗术东和李海燕，2014）。分析倒春寒对千粒重产生差异的原因，可能是植物更倾向于将养分分配给种子数较少的果荚，从而产生更大的种子（Zou *et al.*，2017）。倒春寒使油用牡丹减产的具体机制还有待进一步研究明确。

参考文献 (References)

Abrol DP, Shankar U, 2011. Pollination in Oil Crops: Recent Advances and Future Strategies. Technological Innovations in Major World Oil Crops 2. New York, NY: Springer. 221–267.

Abrol DP, 2012. Pollination-Basic Concepts//Pollination Biology. Dordrecht: Springer. 37–54.

Chen SL, 2001. Chinese Apiculture. Beijing: China Agricultural Press. 178−196. [陈盛禄, 2001. 中国蜜蜂学. 北京: 中国农业出版社. 178–196.]

Chen X, Yu M, Cai HM, Wu Y, Zhang LL, Ke YY, Xu H, Li JC, 2021. Current status and research advances of late spring coldness in wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 32(8): 2999–3009. [陈翔, 于敏, 蔡洪梅, 吴宇, 张乐乐, 柯媛媛, 许辉, 李金才, 2021. 小麦倒春寒研究现状与进展. 应用生态学报, 32(8): 2999–3009.]

Free JB, 1993. Insect Pollination of Crops. 2nd Enlarged Edition, London: Academic Press. 684.

Frioni T, Green A, Emling JE, Zhuang SJ, Palliotti A, Sivilotti P, Falchi R, Sabbatini P, 2017. Impact of spring freeze on yield, vine performance and fruit quality of *Vitis* interspecific hybrid Marquette. *Scientia Horticulturae*, 219: 302–309.

Gao Y, Zhang YX, Ma Q, Su SN, Li CY, Ding JF, Zhu M, Zhu XK, Guo WS, 2021. Effects of low temperature in spring on fertility of pollen and formation of grain number in wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 47(1): 104−115. [高芸, 张玉雪, 马泉, 苏盛楠, 李春燕, 丁锦峰, 朱敏, 朱新开, 郭文善, 2021. 春季低温对小麦花粉育性及粒数形成的影响. 作物学报, 47(1): 104–115.]

Garibaldi LA, Steffan-Dewenter I, Winfree R., Aizen MA, Bommarco R, Cunningham SA, Kremen C, Carvalheiro LG, Harder LD, Afik O, Bartomeus I, Benjamin F, Boreux V, Cariveau D, Chacoff NP, Dudenhöffer JH, Freitas BM, Ghazoul J, Greenleaf S, Hipólito J, Holzschuh A, Howlett B, Isaacs R, Javorek SK, Kennedy CM, Krewenka KM, Krishnan S, Mandelik Y, Mayfield MM, Motzke I, Munyuli T, Nault BA, Otieno M, Petersen J, Pisant G, Potts SG, Rader R, Ricketts TH, Rundlöf M, Seymour CL, Schüepp C, Szentgyörgyi H, Taki H, Tscharntke T, Vergara CH, Viana BF, Wanger TC, Westphal C, Williams N, Klein AM, 2013. Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *Science*, 339(6127): 1608–1611.

He CL, Zhang KY, Han DB, Wang SB, Hou XG, Zhu CD, 2020. Foraging behavior of honeybees (*Apis mellifera* L.) and ground bumblebees (*Bombus terrestris* L.) and its influence on seed yield and oil quality of oil tree peony cultivar 'fengdan' (*Paeonia ostii* T. Hong et JX. Zhang), *Journal of Apicultural Science*, 64(1): 131–142.

He CL, Zhang KY, Hou XG, Han DB, Wang SB, 2019. Foraging behavior and pollination efficiency of *Apis mellifera* L. on the oil tree peony 'Feng Dan' (*Paeonia ostii* T. Hong et J. X. Zhang). *Insects*, 10(4): 116.

Han X, Cheng FY, Xiao JJ, Wang YL, Zhang D, Wang Y, Zhong Y, 2014. Crosses of *Paeonia ostii* ' Feng Dan Bai' as maternal parents and an analysis on the potential in tree peony breeding. *Journal of Beijing Forestry University*, 36(4): 122–125. [韩欣, 成仿云, 肖佳佳, 王越岚, 张栋, 王莹, 钟原, 2014. 以'凤丹白'为母本的杂交及其育种潜力分析. 北京林业大学学报, 36(4): 122–125.]

Hao XY, Wang L, Zeng JM, Li NN, Ding CQ, Yang YJ, Wang XC, 2020. Effects of low temperature and freezing injury on tea plant physiology and its countermeasures. *China Tea*, 42(5): 13–16. [郝心愿, 王璐, 曾建明, 李娜娜, 丁长庆, 杨亚军, 王新超, 2020. 低温冻害对茶树生理的影响及应对技术.中国茶叶, 42(5): 13–16.]

Javorek SK, Mackenzie KE, Vander Kloet SP, 2002. Comparative pollination effectiveness among bees (Hymenoptera: Apoidea) on lowbush blueberry (Ericaceae: *Vaccinium angustifolium*). *Annals of the Entomological Society of America*, 95(3): 345–351.

Jing CZ, 1999. Effects of low temperature at flowering stage on fruit setting of fragrant pear and measures to improve fruit setting rate. *Rural Science Technology*, 1999(5): 18. [井春芝, 1999. 花期低温对香梨座果的影响及提高座果率措. 农村科技, 1999(5): 18.]

Karimzadeh SH, Ghorbani DA, Bahador M, 2019. Temperature effect on yield of winter and spring irrigated crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 279: 107664.

Kaur A, Ferguson L, Maness N, Carroll B, Reid W, Zhang L, 2020. Spring freeze damage of pecan bloom: A review. *Horticulturae*, 6(4): 82.

Klatt BK, Holzschuh A, Westphal C, Clough Y, Smit I, Pawelzik E, Tscharntke T, 2014. Bee pollination improves crop quality, shelf life and commercial value. *Proceedings of the Royal Society B*, 281(1775): 20132440.

Klein AM, Vaissière BE, Cane JH, Steffan-Dewenter I, Cunningham SA, Kremen C, Tscharntke T, 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proc. R. Soc. Lond. B*, 274(1608): 303–313.

Lei YZ, 2017. Effect of bees pollination on fruit setting rate and fruit traits of Fuji apple in the irrigation area of Ningxia. Master dissertation. Ningxia: Ningxia Univerity. [雷亚珍, 2017. 蜜蜂授粉对宁夏引黄灌区富士苹果座果及果实性状的影响. 硕士学位论文. 宁夏: 宁夏大学.].

Li HZ, 2018. Spring freeze cold to pear production in Luxi plateau and protective countermeasures. *Nongmin Zhifuzhiyou Yuekan*, 2018(18): 112. [李洪彰, 2018. 倒春寒对泸西高原梨生产的危害及防护对策. 农民致富之友, 2018(18): 112.]

Li J, Liu J, Chen D, Sun SX, Tu MY, Song HY, Liu CY, Jiang GL, 2018. Causes and prevention measures of low temperature frost in plum blossom period. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2018(8): 103, 105. [李靖, 刘佳, 陈栋, 孙淑霞, 涂美艳, 宋海岩, 刘春阳, 江国良, 2018. 李花期低温霜冻发生原因及防治措施. 现代农业科技, 2018(8): 103, 105.]

Li X, Cai J, Liu F, Dai T, Cao W, Jiang D, 2014. Spring freeze effect on wheat yield is modulated by winter temperature fluctuations: Evidence from Meta-analysis and simulating experiment. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 201(4): 288–300.

Li XN, Pu HC, Liu FL, Zhou Q, Cai J, Dai TB, Cao WX, Jiang D, 2015. Winter wheat photosynthesis and grain yield responses to spring freeze. *Crop Ecology & Physiology*, 107(3): 1002–1010.

Li YC, 2019. Study on Oil Tree Peony in China. Beijing: China Forestry Publishing House. 11–34. [李育材, 2019. 中国油用牡丹研究. 北京: 中国林业出版社. 11–34.]

Luo CW, Chen Y, Zhang T, 2019. Pollination efficiency of the major pollinators of *Paeonia ostia* 'Feng Dan'. *Journal of Nanjing Forestry University* (*Natural Science Edition*), 43(4): 148–154. [罗长维, 陈友, 张涛, 2019. 油用牡丹'凤丹'主要传粉昆虫的传粉行为比较. 南京林业大学学报(自然科学版), 43(4): 148–154.]

Luo SD, Li HY, 2014. Bee Pollination and Nectar Source Plants. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. 13–17. [罗术东, 李海燕, 2014. 蜜蜂授粉与蜜粉源植物. 北京：中国农业科学技术出版社. 13–17.]

Luo YB, Pei YL, Pan KY, Hong DY, 1998. A study on pollination biology of *Paeonia suffruticosa* subsp. *spontanea* (Paeoniaceae). *Acta Phytotaxonomica Sinica*, 36(2): 134–144. [罗毅波, 裴颜龙, 潘开玉, 洪德元, 1998. 矮牡丹传粉生物学的初步研究. 植物分类学报, 36(2): 134–144.]

Ollerton J, 2017. Pollinator diversity: Distribution, ecological function, and conservation. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48: 353–376.

Riccardo B, Lorenzo M, Bernard E, Vaissière, 2012. Insect pollination enhances seed yield, quality, and market value in oilseed rape. *Oecologia*, 169(4): 1025–1032.

Silva CAS, Godoy WAC, Jacob CRO, Thomas A, Camara GMS, Alves DA, 2018. Bee pollination highly improves oil quality in sunflower. *Sociobiology*, 65(4): 583−590.

Stern RA, Rozen A, Eshed R, Zviran T, Sisai I, Sherman A, Irihimovitch V, Sapir G, 2021. Bumblebees (*Bombus terrestris*) improve 'Hass' Avocado (*Persea americana*) pollination. *Plants*, 10: 1372.

Thomson JD, Goodell K, 2001. Pollen removal and deposition by honeybee and bumblebee visitors to apple and almond flowers. *Journal of Applied Ecology*, 38(5): 1032–1044.

Wang SL, Ren XX, Xue JQ, Zhang XX, 2016. Research progress in the competent, function and process technology of peony seed oil. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 31(3): 139–146. [王顺利, 任秀霞, 薛璟祺, 张秀新, 2016. 牡丹籽油成分、功效及加工工艺的研究进展. 中国粮油学报, 31(3): 139–146.]

Wang XJ, Liang HY, Guo DL, Guo LL, Duan XG, Jia QS, Hou XG, 2019. Integrated analysis of transcriptomic and proteomic data from tree peony (*P. ostii*) seeds reveals key developmental stages and candidate genes related to oil biosynthesis and fatty acid metabolism. *Horticulture Research*, 6(1): 1–19.

Xie LH, Niu LX, Zhang YL, Zhang YL, Jin M, Ji D, Zhang XX, 2017. Pollen sources influence the traits of seed and seed oil in *Paeonia ostii* 'Feng Dan'. *Hort Science*, 52(5): 700–705.

Yang WG, Huang YX, Liu KQ, Fan JJ, Meng CL, 2018. Study on the meteorological index and grading of late spring coldness. *Hubei Agricultural Sciences*, 57(15): 49–53. [杨文刚, 黄永学, 刘可群, 范进进, 孟翠丽, 2018. 倒春寒气象指标及等级划分研究. 湖北农业科学, 57(15): 49–53.]

Zhang H, Han C, Breeze TD, Li MD, Mashilingi SK, Hua J, Zhang WB, Zhang XB, Zhang SW, An JD, 2022a. Bumblebee pollination enhances yield and flavor of tomato in gobi desert greenhouses. *Agriculture*, 12(6): 795.

Zhang KY, He CL, Chen LL, Han DB, Hou XG, 2019. Study of pollination ecology of bumblebees on *Paeonia ostii* 'Fengdan'. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 48(8): 102−109. [张凯月, 贺春玲, 陈玲玲, 韩懂博, 侯小改, 2019. 地熊蜂在油用牡丹凤丹'上的传粉生态学研究. 河南农业科学, 48(8): 102–109.]

Zhang KY, He CL, Wang SB, Hou XG, 2022b. Influence of pollination methods on fruit development, fruit yield and oil quality in oil tree peony. *Scientia Horticulturae*, 295: 110877.

Zhen CF, 2007. Occurrence and spring management of freezing injury of fruit trees. *Northern Horticulture*, 2007(9): 114. [甄灿福, 2007. 果树冻害的发生及春季管理. 北方园艺, 2007(9): 114.]

Zhou RF, Zhang QW, Wu WT, 2011. Harm of low temperature, cloudy rain and late spring cold to early rice planting and its defense measures. *Serves of Agricultural Technology*, 28(11): 1627–1629. [周荣芳, 张晴雯, 吴文婷, 2011. 春季低温阴雨和倒春寒对早稻播种的危害及防御措施. 农技服务, 28(11): 1627−1629.]

Zhang XM, 2017. Fruit trees beware of spring freeze. *Modern Agriculture*, 2017(10): 4–5. [张秀梅, 2017. 果树春季防冻警惕倒春寒. 现代农业, 2017(10): 4–5.]

Zou Y, Xiao HJ, Bianchi FJ, Jauker F, Luo SD, van der Werf W, 2017. Wild pollinators enhance oilseed rape yield in small-holder farming systems in China. *BMC Ecology*, 17(1): 6.